

# Análisis numérico del huracán Gordon

## Y DIAGNOSTICO DE SUS EFECTOS HIDRODINÁMICOS EN LAS COSTAS DE CÁDIZ

GABRIEL DIAZ-HERNANDEZ<sup>1</sup>, FERNANDO J. MENDEZ<sup>1</sup>, ROBERTO MINGUEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL DE CANTABRIA, "IH CANTABRIA" UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, C/ ISABEL TORRES Nº 15. SANTANDER, 39011, ESPAÑA; (+34) 942-201810; EMAIL: DIAZG@UNICAN.ES

El objetivo del estudio es evaluar numéricamente el comportamiento espacio-temporal de las variables medioambientales oceánicas (altura de ola significativa  $H_s$ , periodo de pico  $T_p$ , dirección media  $\theta$  y forma espectral  $y$ ), su generación y propagación, asociados al huracán Gordon, acontecido durante la segunda mitad del mes de agosto de 2012, con el objetivo general de poder realizar un diagnóstico de los efectos hidrodinámicos de este evento ciclónico sobre las costas de Cádiz, España.

La acción de los vientos extremos asociados al huracán sobre la superficie del océano, fomentaron la adición de energía en frecuencias atípicamente bajas del espectro del oleaje (alrededor de 14 s), en la zona costera de Cádiz. Este efecto se tradujo en la creación de una componente de mar de fondo que llegó a acoplarse con el oleaje pre-existente en la zona, llegando a inducir un importante y súbito aumento en las corrientes costeras del litoral Gaditano.

En el presente estudio se presentan los resultados de un análisis integral para analizar los eventos relacionados a la generación del oleaje y su propagación hacia las costas de Cádiz, en relación con el paso del huracán Gordon (2012). A través del empleo de la modelación numérica de la generación, propagación e interacción del oleaje en costa en el dominio oceánico del Atlántico Nororiental.

**Palabras clave:** Huracanes, corrientes costeras, propagación de oleaje, clima marítimo

### 1. Introducción

El huracán Gordon (2012), pertenece a la familia de huracanes del Atlántico Norte que se trasladan con una dirección predominante de Oeste a Este y que logran sobrepasar el límite geográfico de  $-26^\circ$  longitud, logrando evolucionar energéticamente, desde su formación como tormentas tropicales a huracanes, por debajo de la categoría 3 (en la escala de vientos Saffir-Simpson), llegando a establecer vientos sostenidos superiores a 200 km/h.

Dicha familia de huracanes, se caracteriza por tener una presencia histórica inusual y estadísticamente baja, presentando entre 1 a 3 eventos ciclónicos por década (basado en la base de datos HURDAT, 1850-2012), siendo los más representativos los huracanes: Carrie (1957, categoría 1), Hannah (1959, categoría 2), Debbie (1961, categoría 1), Fran (1973 categoría 1), Emmy (1976, categoría 1), Floyd (1993, categoría 1), Gordon (2006, categoría 1), y Vince (2005, categoría 1).

Según el informe oficial del huracán Gordon (NHC, 2012), el evento alcanzó la categoría 2, y se debilitó a categoría 1 al alcanzar la Isla de Santa María en las Azores, Portugal (ver figura 1), llegando a causar inundaciones, menores en diversas zonas costeras de las Azores, registrando caída de árboles, cortes de energía y deslizamientos de tierra, sin llegar estas a significar pérdidas materiales significativas ni muertes. La figura 1 muestra el *best-track* para el huracán Gordon (NHC, 2012).

Se presume que el huracán Gordon fue el causante directo de un súbito e inusitado comportamiento en la hidrodinámica litoral a lo largo de las costas de Cádiz, relacionado con la observación

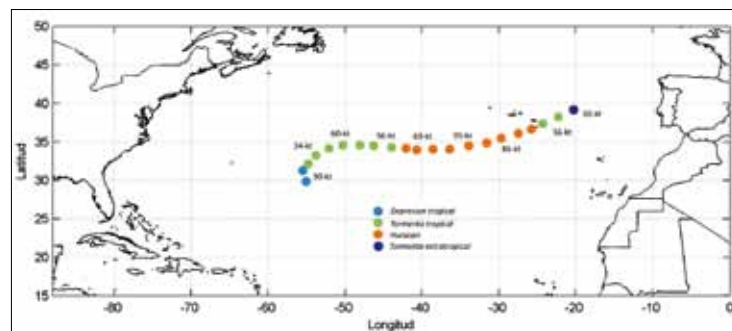


Figura 1. Posiciones temporales (*best-track*) para el huracán Gordon, agosto de 2012.

en costa de estados de mar de baja severidad  $H_s \approx 1$  m, periodos altos alrededor de  $T_p \approx 14$  s, y generación de corrientes de retorno de alta energía, cuya virulencia llegó a comprometer el uso seguro de los bañistas en la costa, entre los días 21 y 22 de agosto de 2012, lo cual obligó a una actuación urgente de los equipos de rescate y salvamento.

Este comportamiento atípico en las corrientes litorales, se atribuye a un forzamiento energético derivado del paso de dicho huracán a lo largo del Océano Atlántico Nororiental, cuyas características propias, implicaron una radical modificación en el ordenamiento de la energía espectral del oleaje incidente frente a la zona costera de Cádiz, antes y después del paso del ciclón.

En este artículo se describe la metodología, uso y validación de un sistema de modelos numéricos acoplados para poder gene-

rar, propagar e interactuar en costa el oleaje asociado al evento del huracán Gordon del año 2012.

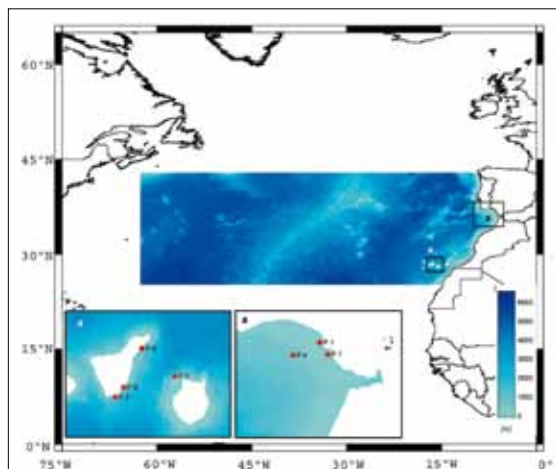
## 2. Datos de partida y modelos utilizados

Conforme el huracán Gordon fue propagándose a lo largo del Atlántico Nororiental, diversos equipos instrumentales, desplegados en la zonas costeras y oceánicas, lograron medir la historia temporal del oleaje, lo cual supone una valiosa información que permite identificar la evolución y desarrollo de esta variable y su generación por la acción del viento de alta energía, que actúa sobre la superficie del océano durante los días anteriores y posteriores a la tormenta.

### 2.1 BATIMETRÍA Y DATOS INSTRUMENTALES DE OLAJE

Para la implementación en este estudio, se han considerado los datos batimétricos de las cartas náuticas del Servicio de Hidrográfico de la Marina Española número: 443, 444 y 445, integradas con la información batimétrica a gran escala del GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), cubriendo el dominio espacial de longitud  $[-65^\circ, -5^\circ]$  y latitud  $[25^\circ, 43^\circ]$ , para de esta forma poder cubrir la totalidad de la zona costera de Cádiz, desde Sanlúcar de Barrameda al Norte, hasta Tarifa al Sur, cubriendo una longitud de costa aproximada de 100 km (ver figura 2).

**Figura 2.** Batimetría aportadas por el GEBCO + cartas náuticas, para el dominio espacial: longitud  $[-65^\circ, -5^\circ]$  y latitud  $[25^\circ, 43^\circ]$ , y localización de las boyas aportadas por Puertos del Estado.



Puertos del Estado posee en la actualidad varios tipos de sensores de medidas oceanográficas situados a lo largo de la Costa española. La figura 2 aporta los detalles de localización de las boyas empleadas en el presente estudio. Estas boyas se encuentran en las proximidades del paso del huracán Gordon, tanto para aguas abiertas, como para las zonas costeras de las Islas Canarias y Cádiz, España. Todas ellas lograron registrar las series temporales de oleaje para todo el mes de agosto de 2012.

### 2.2 DATOS NUMÉRICOS DE VIENTO OCEÁNICO DE MEDIA RESOLUCIÓN

Los datos numéricos o de reanálisis de viento son necesarios para el estudio del clima marítimo a través de uso como forzamiento de los modelos oceánicos de propagación del oleaje. En particular, el reanálisis de oleaje está condicionado por la disponibilidad de reanálisis atmosféricos, más concretamente de vientos en superficie (a 10 m de altura sobre el nivel medio del mar, W).

Las bases de datos procedentes de reanálisis numérico atmosférico, constituyen una fuente de información muy valiosa, ya que permiten el estudio de la evolución en el tiempo de las diferentes variables relacionadas al oleaje, que de otra forma, no se dispone de registros suficientemente largos (p. Ej. datos instrumentales).

En este estudio se han utilizado los campos de vientos 6-horarios del reanálisis denominado ERA-Interim por ser las series de datos con mejor asimilación de datos instrumentales a partir de información satelital.

### 2.4 DATOS NUMÉRICOS DE VIENTO DE ALTA RESOLUCIÓN ASOCIADO A HURACANES

En los últimos tiempos, los estudios que se encargan de evaluar numéricamente la generación del oleaje por eventos de huracán: (Smith, et al. 2001); (Palmsten y Sallenger, 2001); (Powell et al. 2010); (Dietrich et al., 2010 & 2011); (Kennedy et al., 2011); (Bunya et al, 2010); emplean la información proveniente de la base de datos H\*WIND (Powell et al., 1998), donde asimilan los campos de viento y presión desarrollados, con una combinación óptima de la capa límite planetaria (PBL) modelada (Thompson y Cardone, 1996) para las presiones y los análisis cinemáticos realizados por la *Hurricane Research Division* (HRD), todo ello desarrollado a partir de mediciones de viento para los eventos de huracán (Bender et al., 2013).

Esta base de datos permite obtener los campos de viento de alta resolución disponibles para todos los eventos de huracán desde el año 1993. Todos los mapas de viento son válidos para forzar adecuadamente modelos numéricos de propagación de oleaje y marea meteorológica.

## 3. Modelos numéricos: descripción e implementación

En esta sección se describe de manera general las ecuaciones, uso e implementación de los modelos SWAN (Booij et al., 1999) y MOPLA (González et al., 2007), para la propagación del oleaje y su interacción con la costa respectivamente. Adicionalmente se presenta el diseño de los dominios numéricos con base en los contornos costeros y batimétricos.

### 3.1 MODELO SWAN

El modelo SWAN predice la evolución de la acción del espectro de oleaje, en un dominio espacio geográfico y temporal, considerando la frecuencia relativa y la dirección del oleaje, gobernadas por la ecuación de balance propuesta por Booij et al., (1999).

El modelo SWAN es capaz de reproducir adecuadamente los fenómenos de refracción y asomeramiento a lo largo de la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona costera, en función de la variación espacial del fondo y corrientes, considerando la tasa de cambio en la fase y la tasa de giro de la dirección de propagación del oleaje. El modelo gestiona el crecimiento del oleaje por la acción del viento sobre la superficie del océano, disipación por *whitecapping*, rotura de oleaje y fricción con el fondo.

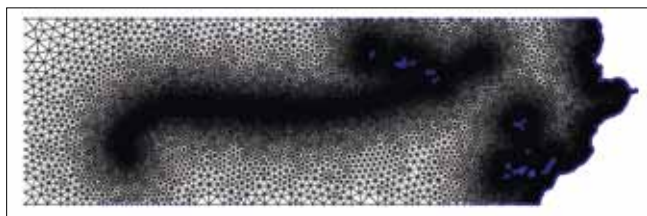
En el presente estudio se ha usado la versión en malla no estructurada del modelo SWAN presentada por (Zijlema, 2010), con la evidente ventaja de poder optimizar los recursos computacionales, a través de una óptima definición del modelo numérico.

## Análisis numérico del huracán Gordon

rico en consonancia con las características del forzamiento de viento utilizado.

Para llevar a cabo la simulación numérica del huracán Gordon, se ha planteado en este estudio un dominio numérico rectangular que cubra las coordenadas longitud  $[-65^\circ, -5^\circ]$  y latitud  $[25^\circ, 43^\circ]$ , sobre el cual se proyectan los contornos costeros e islas (fuente: NOAA *shoreline/coastline data*), así como la información batimetría utilizada (fuente: *General Bathymetric Chart of the Oceans*, GEBCO, con una resolución de  $0.5^\circ$ ).

A fin de optimizar el número de elementos triangulares de la malla no estructurada para el modelo SWAN, y al mismo tiempo describir adecuadamente los campos de viento del huracán de alta resolución, se ha diseñado una malla que concentra sus elementos a lo largo de la trayectoria del huracán, considerando un tamaño mínimo de elemento correspondiente aproximadamente a  $0.05^\circ$  (ver figura 3).



**Figura 3.** Dominio espacial: longitud  $[-65^\circ, -5^\circ]$  y latitud  $[25^\circ, 43^\circ]$  usado por el modelo SWAN, para la malla de elementos triangulares no estructurados.

### 3.2 MODELO MOPLA

El modelo MOPLA es una herramienta desarrollada por el IH Cantabria que permite el estudio de la evolución morfológica de las zonas costeras. Se basa en el estudio de los procesos individuales de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos, en el ámbito 2DH. El modelo consta de tres módulos acoplados: el módulo de transformación de onda (OLUCA), el módulo de corrientes de rotura promediadas en vertical (COPLA), y el módulo de transporte de sedimentos y la evolución morfológica (EROS). En el presente estudio se han empleado únicamente los módulos OLUCA y COPLA.

El módulo OLUCA es un modelo promediado en la fase de onda que permite la resolución de los fenómenos de alta resolución en costa (a una escala no admitida por el modelo SWAN), de: refracción, asomeramiento, difracción y rotura, teniendo en cuenta los efectos débilmente no lineales que experimenta el oleaje en aguas someras, a través de la propagación de espectros de oleaje direccionales sobre un fondo batimétrico real. Adicionalmente, el modelo OLUCA tiene en cuenta los efectos de disipación de energía por fricción en el fondo y rotura.

El modelo incluye las aproximaciones de rotura de oleaje en playa propuestas por (Battjes y Janssen, 1978), (Thornton y Guza, 1983), y (Rattanapitikon y Shibayama 1998). El modelo OLUCA es una herramienta ingenieril muy eficiente, debido a que requieren esfuerzos computacionales muy bajos, siendo ampliamente usados en el ámbito de la consultoría en la ingeniería de costas.

El módulo COPLA es capaz de operar con una interacción oleaje-corriente, teniendo en cuenta la rugosidad del terreno y las

fluctuaciones turbulentas (viscosidad de remolino), derivadas a la rotura del oleaje. Una descripción detallada acerca las formulaciones y la implementación del modelo se presenta en (GIOC, 2003).

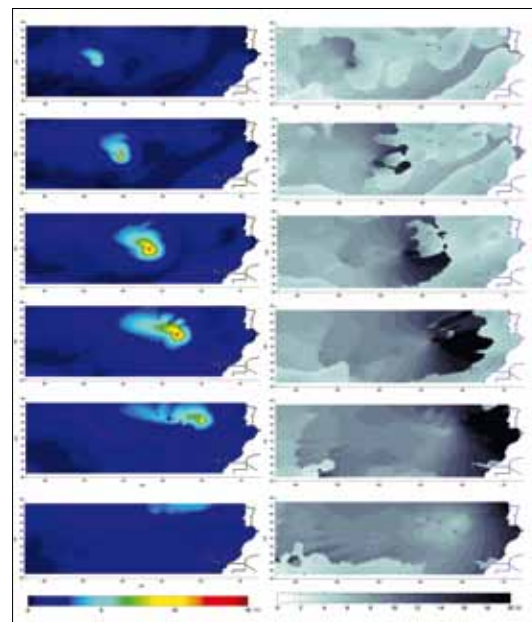
## 4. Propagación numérica del oleaje asociado al evento de huracán Gordon 2012

Para la ejecución del modelo SWAN para la malla no estructurada mostrada en la figura 3, se tuvieron que adaptar los mapas de viento interpolados espacial y temporalmente en el dominio numérico predefinido. La simulación realizada aporta archivos de salida en forma de mapas de  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta$ , viento y dirección del viento, así como los espectros de oleaje en cualquier punto dentro del dominio numérico.

### 4.1 SIMULACIÓN DEL EVENTO DEL HURACÁN GORDON (2012)

Se ha realizado una simulación con el modelo SWAN considerando un forzamiento no estacionario de viento, que representa la creación, evolución, propagación y disipación del huracán Gordon, a partir del día 10 de agosto de 2012, hasta el día 28 del mismo mes. La figura 4 (paneles en la izquierda) muestra la evolución de la altura de ola significativa conforme evoluciona energéticamente el huracán Gordon, llegando esta a presentar altura de ola cercana a  $H_s \approx 12$  m en la zona adyacente a la trayectoria del huracán. Este aumento en la altura de ola cerca del centro del huracán, no llega a propagarse hacia la zona costera de España en general, y hacia la zona de Cádiz en particular, únicamente llegando a generar un oleaje inferior a  $H_s < 2$  m en la zona del Golfo de Cádiz.

Con respecto al periodo de pico (ver paneles en la derecha en la figura 4), se observa que conforme el huracán comienza a trasladarse con dirección Este, se comienzan a formar frentes espaciales de aumento de esta variable registrada numéricamente por el modelo SWAN. Se observa que a partir del 20 de agosto de 2012, dicho frente de aumento del periodo de pico comenzó a penetrar al Golfo de Cádiz, llegando a inundar esta zona con periodos superiores a  $T_p > 12$  s alcanzando la zona costera de Cádiz, y la costa de Portugal a lo largo de las horas siguientes, presentando una disminución lenta de este mar de fondo a partir de la úl-



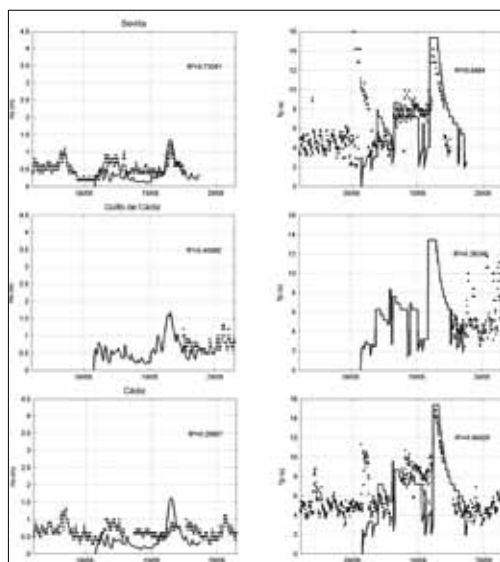
**Figura 4.** Evolución de  $H_s$  y  $T_p$  para el huracán Gordon, obtenido con el modelo SWAN.



timas horas del día 21 hasta el 24 de agosto de 2012, día en que se recobró un periodo de pico cercano a  $T_p=5$  s.

#### 4.2 COMPARACIÓN DEL MODELO SWAN CON DATOS INSTRUMENTALES

La figura 5 muestra la evolución del oleaje para las boyas Costeras de Sevilla y Cádiz y la boya Oceánica del Golfo de Cádiz. Se aprecia que el modelo SWAN es capaz de reproducir adecuadamente la evolución de la altura de ola significativa para el evento del huracán Gordon, mostrando que los valores de este parámetro espectral muestran un aumento en su magnitud a partir del día 19 de agosto aproximadamente, alcanzando un aumento máximo de 1.5 m, coincidiendo con las mediciones instrumentales. Concluyendo que el aporte energético del huracán Gordon en la zona del Golfo de Cádiz es de alrededor de 1 m de altura de ola significativa, debido a que, como se puede observar en la figura 5, los valores de  $H_s$  antes y después del evento eran de alre-



**Figura 5.** Validación del oleaje aportado por el modelo SWAN con la información instrumental aportada por las boyas de Puertos del Estado en la zona del Golfo de Cádiz. Modelo numérico SWAN (línea) vs. Serie instrumental (puntos).

dor a 0.5 m, coincidiendo con las observaciones de Protección Civil, Policía Local y Cruz Roja, según información aportada por la Asociación Internacional de Gestores de Emergencias (*International Association of Emergency Managers*) (IAEM, 2013).

Con respecto a la evolución del periodo de pico para esas mismas fechas, se puede apreciar que las boyas registraron un abrupto aumento en los periodos de pico por encima de 12 s, llegando a alcanzar en su evolución máxima un valor de 14 s, para el día 21 de agosto de 2012.

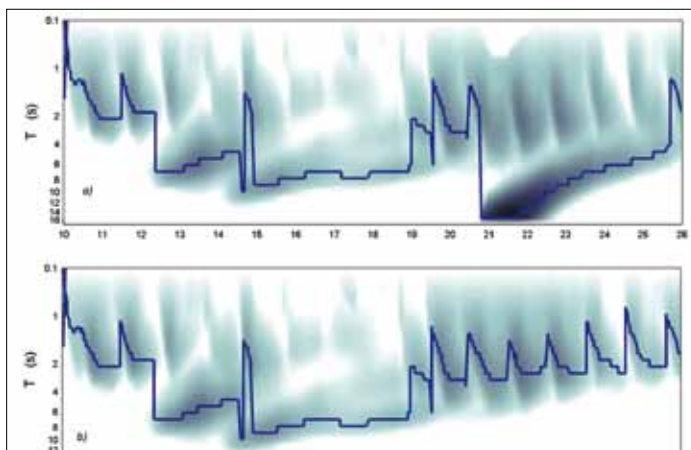
Este aumento se presentó de forma brusca y súbita, alcanzando el valor máximo en pocas horas, para después mostrar una evolución decreciente o disminución del periodo de pico a lo largo de los siguientes 3 días aproximadamente, para finalmente alcanzar los valores habituales de alrededor de 5 s en las tres boyas.

#### 4.4 ANÁLISIS DE LA MODIFICACIÓN ESPECTRAL DEBIDA AL HURACÁN

En la presente sección se muestra el análisis de la información espectral registrada por el modelo numérico frente a la zona costera de Cádiz en el punto de acoplamiento entre el modelo

SWAN y el modelo MOPLA (Latitud  $36.131^\circ$  y Longitud  $-6.454^\circ$ ), sobre una profundidad aproximada de 30 m, y se considera representativo del clima marítimo en la zona de aguas intermedias del Golfo de Cádiz.

A fin de poder evaluar la evolución temporal del mar de fondo o aumento en el periodo de pico por efecto del paso del huracán Gordon, en la figura 6 se muestra la evolución temporal de la información espectral (integrada en la dimensión direccional), para el punto 3 y para el paso del huracán Gordon, para dos simulaciones realizadas con el modelo SWAN: a) teniendo en cuenta el forzamiento del viento de media resolución (ERA-Interim + viento de alta resolución (modelo paramétrico), y b) únicamente viento de media resolución (ERA-Interim sin la presencia del huracán).



**Figura 6.** Evolución del espectro de energía de periodos y del periodo de pico en el punto 3 (Latitud  $36.131^\circ$ , Longitud  $-6.454^\circ$ ), para: a) el forzamiento del viento de media resolución + viento de alta resolución, y b) únicamente viento de media resolución (sin la presencia del huracán). Evolución temporal del periodo de pico (línea azul).

En la figura 6a se puede observar claramente, que tras el paso del huracán Gordon, el espectro de oleaje muestra un aumento significativo hacia periodos más altos, alcanzando el límite de los 14 s, con una concentración energética evidente, que se disipa o disminuye tras el paso del huracán en un lapso de 3 a 4 días.

### 5. Propagación numérica del oleaje y corrientes en la zona costera de Cádiz

En esta sección se presenta el análisis numérico de la hidrodinámica en la zona de rompientes a lo largo de la costa de Cádiz, analizando el comportamiento del oleaje y corrientes en playa antes y después del paso del huracán Gordon en agosto de 2012.

Para ello, se emplean los módulos de propagación de oleaje (COPLA) y de evaluación de corrientes asociadas a la rotura del oleaje (COPLA), ambos dentro del modelo MOPLA desarrollado por el IH Cantabria.

Las simulaciones fueron forzadas con la serie horaria de oleaje espectral en cada uno de los puntos de control, aportados por el modelo SWAN, teniendo en cuenta la variación del nivel del mar por marea astronómica, reconstruida con los datos resultantes del análisis armónico realizado con la serie instrumental del mareó-

## Análisis numérico del huracán Gordon

grafo de Bonanza (Latitud: 36.80°, Longitud -6.34° W), aportada por Puertos del Estado.

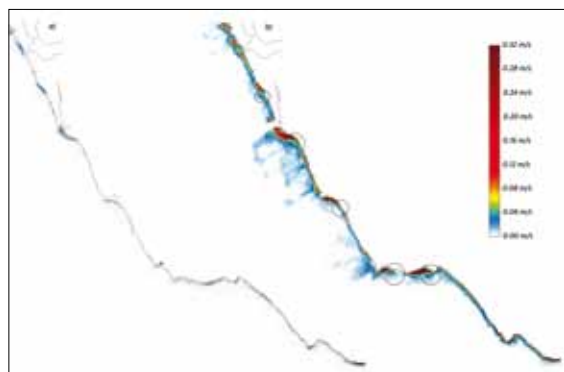
Se ha simulado un total de 332 estados de mar horarios (del 12 de agosto a las 17:00 horas al 26 de agosto a las 12:00 horas) con el modelo MOPLA, a fin de evaluar la evolución del oleaje y las corrientes a lo largo de la línea de costa.

En el presente análisis se realiza una asimilación cualitativa de los resultados con base en el informe presentado por la (AEMI, 2013), en donde se recoge un catálogo de fotografías aéreas oblicuas tomadas durante los eventos de emergencia registrados en la playa de Conil tomadas por protección civil.

### 5.1 RESULTADOS DE OLEAJE Y CORRIENTES

Tras la simulación de los 332 estados de mar horarios en las cuatro mallas numéricas del modelo MOPLA, en esta sección se presentan los resultados del comportamiento del oleaje y corrientes en cada una de ellas.

La figura 7 muestra los mapas de corrientes obtenidos para las cuatro mallas numéricas, comparando un instante previo y durante el paso del mar de fondo inducido por el paso del huracán Gordon para el 15 y 21 de agosto de 2012 respectivamente.



**Figura 7. Mapa de corrientes a lo largo de la costa de Cádiz para dos eventos temporales: a) antes (agosto 20 10:00) y b) después (agosto 21 10:00), de la llegada del mar de fondo inducido por el huracán Gordon.**

En la figura 7 se puede observar la influencia en las corrientes asociadas a la rotura del mar de fondo inducidas por el paso del huracán Gordon frente a las costas de Cádiz.

Se observa que las corrientes antes de la llegada de dicho evento, para el día 20 de agosto de 2012) no superan los 0.05 m/s, es decir, se pueden considerar despreciables para la seguridad del baño.

Por otro lado, cuando el mar de fondo con periodos  $T_p \approx 15$  s alcanza las costas de Cádiz, se observa que las corrientes indu-



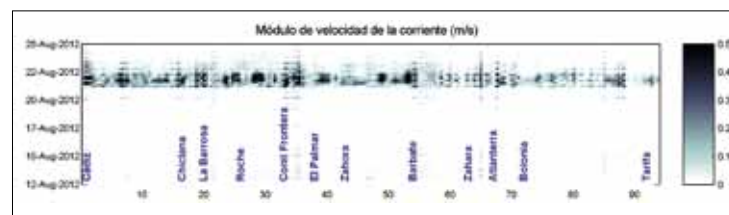
**Figura 8. Fotografía de una corriente de retorno o rip current observada en la costa de Conil de la Fontera durante el evento del mar de fondo observado el 21 de agosto de 2012. Fuente: Protección Civil de Conil de la Fontera.**

cidas por la rotura del oleaje a lo largo de la costa sufren un aumento radical, alcanzando fácilmente corrientes longitudinales medias horarias de 0.5 m/s, e incluso llegando a presentar valores cercanos a 1.0 m/s en algunas zonas puntuales en la zona costera de Cádiz, así como la presencia de corrientes de retorno (*rip currents*, indicados con círculos en la figura 7), fomentados por el cambio de dirección en la oblicuidad del oleaje incidente.

Estos valores coinciden con lo observado por Protección Civil (ver fotografía en la figura 8) y con la seguridad de baño en la playa que se vio comprometida durante los días del evento del mar de fondo.

Este tipo de patrones en corrientes en playas se puede interpretar fácilmente como una “bandera roja” que restringe cualitativamente el baño en costa, debido a la presencia de oleaje de fondo, con fuentes corrientes longitudinales y corrientes de retorno persistentes, según indica las recomendaciones aportadas por la guía operacional para la seguridad en playas europeas, publicado por la *Royal Society for the Prevention of Accidents*, (RoSPA, 2005).

Finalmente, la figura 9 muestra la evolución temporal y espacial del módulo de velocidad de las corrientes, para las simulaciones horarias (antes, durante y después del paso del huracán Gordon), realizadas con el modelo MOPLA.



**Figura 9. Evolución espacio-temporal de la altura del módulo de velocidad de las corrientes a lo largo de la costa de Cádiz, para las fechas antes, durante y después del paso del huracán Gordon.**

En la figura 9 se puede observar, en primer lugar, el cambio que experimenta el módulo de velocidad e la corriente en rotura en donde se aprecia la evolución espacio temporal de esta variable generada por la acción del mar de fondo, mostrando paquetes bien definidos de corrientes por encima de  $U > 0.5$  m/s a lo largo de la costa de Cádiz, asociados a cambios bruscos del ángulo de rotura de 50 a 150°, lo cual se asocia a la presencia de corrientes de retorno de alta energía.

## 6. Conclusiones

Este estudio se ha evaluado la generación, propagación e interacción con la costa del oleaje generado por el paso del huracán Gordon en la zona Nororiental del Atlántico, durante la segunda mitad del mes de agosto de 2012.

Se ha realizado un diagnóstico integral de la propagación de oleaje e interacción con la costa y zona de rompientes, a través del acoplamiento de herramientas analíticas y numéricas, así como estrategias de fusión de bases de datos de diferentes escalas espacial y temporal.

Se ha observado que el modelo SWAN es una herramienta versátil y fiable para llevar a cabo estudios sobre generación y propagación de oleaje, asociado a eventos de huracán, a través

de su implementación no estacionaria, el uso de mallas adaptativas e irregulares, la implementación de forzamientos complejos de viento de alta resolución, y la inclusión de contornos geográficos y batimétricos reales.

Se ha validado satisfactoriamente el oleaje numéricamente generado y propagado en diferentes estaciones de medidas (boyas) aportadas por Puertos del Estado.

Se ha acoplado satisfactoriamente los resultados de oleaje generados por el modelo SWAN al modelo MOPLA para su propagación hacia la zona de rompientes y la obtención de la magnitud y dirección de los patrones de corrientes asociadas a la rotura del oleaje.

Se concluye que el huracán Gordon generó un oleaje de fondo con altura de ola de  $H_s=1.5\text{ m}$  y periodos de pico alrededor de  $T_p=14\text{ s}$  durante los días 21 a 23 de agosto del año 2012.

Dichos estados de mar, que se generaron de forma inusual y súbita en el lapso de pocas horas, interactuaron con la costa fomentando la aparición de fuertes corrientes (por encima de  $0.5\text{ m/s}$ ), y corrientes de retorno a lo largo de la costa de Cádiz.

Es importante mencionar, que existe la posibilidad real que un evento de estas características se llegue a repetir en las costas Españolas, por lo que es deseable que las autoridades planteen en un futuro un sistema operacional de alerta temprana de huracanes, que logre predecir los efectos de este tipo de mar de fondo, su duración, magnitud, y efectos en costa, a fin de poder establecer los planes de seguridad, aviso a la población y contingencia.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Puertos del Estado por la información instrumental otorgada, y a la Asociación Internacional de Gestores de Emergencias (*International Association of Emergency Managers*, IAEM), por el apoyo, información recabada por la Cruz Roja y Protección civil de la zona Costera de Cádiz, información fotográfica (Protección Civil de Conil de la Frontera) y apoyo técnico en general, otorgado a lo largo del desarrollo de este estudio.

## Referencias

- Battjes, J.A., Janssen J.P.F.M. (1978). Energy loss and set-up due breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 569-587.
- Bender C., Smith J.M., Kennedy A., Jensen R. (2013). STWAVE simulation of Hurricane Ike: Model results and comparison to data, Coastal Engineering, Volume 73, March 2013, Pages 58-70, ISSN 0378-3830.
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J. Geophys. Res. C4, 104, 7649-7666.
- Bunya, S., J. C. Dietrich, J. J. Westrink, B. A. Ebersole, J. M. Smith, J. H. Atkinson, R. Jensen, D. T. Resio, R. A. Luetich, C. Dawson, V. J. Cardone, A. T. Cox, M. D. Powell, Dietrich, J. C., S. Bunya, J. J. Westrink, B. A. Ebersole, J. M. Smith, J. H. Atkinson, R. Jensen, D. T. Resio, R. A. Luetich, C. Dawson, V. J. Cardone, A. T. Cox, M. D. Powell, H. J. Westerink, and H. J. Roberts, (2010): "A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part II: Synoptic. Description and Analysis of Hurricanes Katrina and Rita", Mon. Wea. Review, 136, p. 378-404.
- Dietrich, J.C., J. J. Westerink, A. B. Kennedy, J. M. Smith, R. E. Jensen, M. Zijlema, L. H. Holthuijsen, C. Dawson, R. A. Leutttich Jr., M. D. Powell, V. J. Cardone, A. T. Cox, G. W. Stone, H. Pourtaheri, M. E. Hope, S. Tanaka, L. G. Westerink, H. J. Westerink, Z. Cobell, (2011): Hurricane Gustav (2008) waves and storm surge: Hindcast, synoptic analysis, and validation in Southern Louisiana. Mon. Wea.
- GIOC, (2003). 2DH-Morphodynamic Evolution Model for Near Shore Areas (MOPLA). State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 262 (in Spanish).
- González M., Medina R., Gonzalez-Ondina J., Osorio A., Méndez F.J., García E. (2007) An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. Comput. Geosci. 33, 7 (July 2007), 916-931. 2007.
- IAEM (2013). Resaca marina en las costas de Cádiz, 21 de agosto de 2012. Informe International Association of Emergency Managers-España. En revision.
- Kennedy, A. B., U. Gravius, B. C. Zachary, J. J. Westerink, M. E. Hope, J. C. Dietrich, M. D. Powell, A. T. Cox, R. A. Luetich Jr., and R. G. Dean, (2011): Origin of the Hurricane Ike forerunner surge. Geophys. Res. Lett., 38, L08608.
- National Hurricane Center (NHC), (2012) Tropical Cyclone Report, Hurricane Gordon (AL082012), 15-20 August.
- Palmsten, M. L., Sallenger, A. (2001). "Application of the SWAN Wave Model to Hurricane Generated Waves on the North Carolina Continental Shelf". American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Powell, M. D., S. Murillo, P. Dodge, E. Uhlhorn, J. Gamache, V. Cardone, A. Cox, S. Otero, N. Carrasco, B. Annane, and R. St. Fleur, (2010): Reconstruction of Hurricane Katrina's wind fields for storm surge and wave hindcasting. Ocean Engineering, 37, 26-36.
- Rattanapitikon W., Sibayama T. (1998). Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves, Coastal Engineering Journal, Vol. 40, No. 4, p. 327-346.
- RoSPA, (2005). Safety on European Beaches, Operational Guidelines, Royal Society for the Prevention of Accidents. 1st edition.
- Smith J.M., Sherlock A.R., Resio D.T. (2001). STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0 USACE, Engineer Research and Development Center, Technical Report ERDC/CHL SR-01-1.
- Thomson E.F., Cardone V.I. (1996). Practical modelling of hurricane surface wind-fields. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering. 122(4): 195-205.
- Thornton, E. B., Guza R. T. (1983), Transformation of wave height distribution, J. Geophys. Res., 88(C10), 5925-5938
- Zijlema, M., (2010). "Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids". Coastal Engineering 57, 267-277.